

气液两相流临界分配特性及相分离控制

梁法春¹, 王栋², 杨桂云¹, 曹学文¹

(1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 266580, 山东青岛;

2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为实现对气液两相流的均匀分配,提出了一种由旋流叶片、整流器以及两个分流喷嘴组成的新型分配装置。其工作原理是:通过旋流叶片将来流调整为均匀环状流型,以保证两分流喷嘴入口接触气液两相流的几率相等;通过喷嘴加速两相流达到当地声速,形成临界流动,以克服喷嘴下游各支管路阻力特性不一致所导致的相分离。在气液两相流实验环道上开展了实验测试,实验分配器分流喷嘴喉部直径为8 mm,扩张角为21°。实验气相折算速度范围为7~20 m/s,液相折算速度范围为0.013~0.16 m/s,出现的流型包括波浪流、段塞流以及半环状流。结果表明:在喷嘴喉部气液混合物速度达到声速的条件下,气液相分流系数接近理论值0.5,不受上游流型以及气液流速的影响。侧支管干度与主管干度最大偏差小于±5%,而当液相折算速度小于0.02 m/s时,无法形成均匀环状流,气相更容易进入侧支管。提高液相折算速度以及喷嘴差压在分配总压降中所占比重,将有助于降低相分离程度。所提出的分配器结构紧凑,无分离装置和控制元件,基本无需维护,有望在高压两相流分配系统中获得广泛应用。

关键词: 两相流;分配器;控制;喷嘴;临界流;流型

中图分类号: O359 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)01-0053-06

Gas-Liquid Two-Phase Flow Critical Distribution Characteristic and Phase Splitting Control

LIANG Fachun¹, WANG Dong², YANG Guiyun¹, CAO Xuewen¹

(1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China;

2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A novel distributor was proposed to uniformly distribute the gas-liquid two-phase flow. The distributor consists of a swirl vane, a flow adjuster and two nozzles. The swirl vane is used to change the upstream flow into annular flow with uniform film thickness for both nozzles having same inlet condition. The function of the nozzles is to accelerate the gas-liquid mixture to reach local sonic velocity and eliminate the phase separation due to the difference of resistance characteristics of the two branches. The throat diameter of the experimental nozzle is 8 mm and the expansion angle is 21°. Experiments were carried out in an air-water two-phase flow loop. The superficial liquid velocity was in the range of 0.013-0.16 m/s and the superficial gas velocity varied from 7 m/s to 20 m/s. The flow patterns observed included wavy flow, slug flow and semi-annular flow. It was found that equal distribution was obtained under critical flow

收稿日期: 2014-05-01。 作者简介: 梁法春(1977—),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51006123); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(14CX05028A)。

网络出版时间: 2014-10-15

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20141015.1752.002.html>

condition. The splitting ratio of gas and liquid was close to the theoretical value (0.5) and independent of flow patterns, superficial gas or liquid velocity. The maximum quality deviation between outlet branch and the inlet pipe was less than $\pm 5\%$. When the superficial liquid velocity was below 0.02 m/s, no uniform annular flow was achieved and the gas preferred to enter the top branch. Increasing the superficial liquid velocity and the ratio of nozzle pressure loss to the total pressure loss could help to reduce phase separation. The proposed device has the advantages of small size and low cost, and can be used in high pressure gas-liquid two-phase system.

Keywords: two-phase flow; distributor; control; nozzles; critical flow; flow patterns

气液两相流广泛存在于石油、化工、核能、动力等诸多工业领域。在两相流系统中通常面临流体分配问题,即将上游两相流流体均匀分流到下游多个支路中去。两相流分配过程中,下游各支路气液流量和组成并不完全一致,这就是所谓的相分离现象^[1]。相分离的发生严重影响着下游设备的安全和高效运行,如何实现气液两相均匀分配一直是多相流领域的研究热点和前沿课题^[2-4]。Y型和T型三通最早用于相分离控制,研究者希望通过构建对称分配结构来消除相分离^[5-7],但研究表明,气液分配与入口流型、干度等因素有关,对称分配结构只能保证在有限的气液流速范围内实现均匀分配^[2,8]。Wren等人提出在三通管内加装导向板等结构来改善相分离特性,但仅对分层流有效,在其他流型下甚至还会强化两相流体的相分离^[9]。为了克服流型影响,一些研究者提出在入口设置加速管或混合器,对气液两相流进行混合^[10-11],这在一定程度上改善了分配特性,但无法从根本上消除相分离。王栋提出了转鼓型和转轮型两种分配机构,利用气液两相流体驱动转鼓或转轮高速旋转,从而各通道的入口端面不断掠过上游流通截面,使管截面上的两相流体机会均等地流入各个下游通道^[12-13],但其分配核心机构转轮或转鼓结构复杂,制造困难,且为运动部件,在高气液比条件下容易发生卡堵。研究表明,气液两相流分配不但取决于分配器结构,还与各分配器入口参数以及下游管路的压力分布密切相关^[1-2,14],即使分配通道结构完全相同且安装完全对称,如果各分配通道入口气液相分布不同或下游各支管路阻力特性不一致也会发生相分离。气液两相流在临界流动条件下的流动特性主要取决于上游参数,而与下游压力波动无关^[15-16]。以此为灵感,本文提出了基于流型调整和临界分流的气液两相流分配新方法,通过设置旋流叶片和临界分流喷嘴实现了气液两相流的均匀分配。

1 气液两相流两喷嘴分配特性及相分离控制原理

1.1 气液两相流量两喷嘴分流特性分析

图1为气液两相流通过两分流喷嘴分配的示意图,来自于主管1的气液两相流进入分流喷嘴2、3后,再进入下游支管路。气液两相流通过分流喷嘴产生的压降可用下式计算^[17]

$$\Delta P^{1/2} = M(a + bX) \quad (1)$$

式中: M 为通过喷嘴的气液混合物质量流量; ΔP 为两相流通过喷嘴产生的差压; X 为通过喷嘴的两相流质量含气率; a 、 b 为常数,取决于喷嘴结构^[18]。

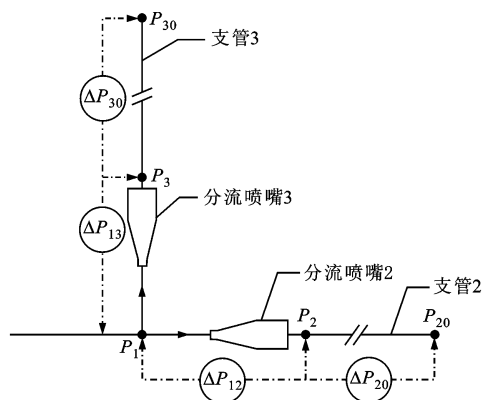


图1 气液两相流分配示意图

由式(1)可知,两相流通过分流喷嘴2、3时产生的差压分别为

$$\Delta P_{12}^{1/2} = M_2(a_2 + b_2X_2) \quad (2)$$

$$\Delta P_{13}^{1/2} = M_3(a_3 + b_3X_3) \quad (3)$$

式中: ΔP_{12} 、 ΔP_{13} 分别为分流喷嘴2、3两侧差压; M_2 、 M_3 分别为通过喷嘴2、3的气液混合物质量流量; X_2 、 X_3 分别为进入分流喷嘴2、3的两相流质量含气率。

如果两个分流喷嘴结构完全相同,则有 $a_2 = a_3$, $b_2 = b_3$; 如果为均匀分配,则有 $M_2 = M_3$, $X_2 = X_3$ 。由式(2)、(3)可知, $\Delta P_{12} = \Delta P_{13}$, 即 $P_2 = P_3$ 。

可见,如果要想实现均匀分配,两分流喷嘴出口需具有相同的压力。事实上,由图 1 可知,两分流喷嘴出口压力 P_3 、 P_2 由分流喷嘴下游管路的阻力特性决定

$$P_3 = \Delta P_{30} + P_{30} \tag{4}$$

$$P_2 = \Delta P_{20} + P_{20} \tag{5}$$

式中: P_{30} 、 P_{20} 分别为支管 3、2 的出口压力; ΔP_{30} 、 ΔP_{20} 分别为喷嘴 3、2 下游支管路中阻力损失。在实际分配系统中, P_{30} 、 P_{20} 并不一定相等,此外 ΔP_{30} 、 ΔP_{20} 与管路规格、倾角、气液流量、流型等参数相关,也并不一定完全一致。可见,为实现均匀分配,以保证各个分流喷嘴具有相同的流动特性,其关键在于保证各个分流喷嘴入口参数相同,并消除下游各支管路阻力特性不一致所导致的相分离。为此,本文提出了基于流型调整和临界分流的相分离控制新方法。

1.2 均匀分配原理

流型调整:在分流喷嘴上游设置流型调整装置,将不对称流型调整为液膜厚度沿周向分布均匀的环状流,以保证各个分流喷嘴入口接触气液相的几率相等。

临界分流:即利用喷嘴对气液混合物进行加速,促进气液两相流在喷嘴喉部达到当地声速,形成临界流动。根据临界流动特性,通过喷嘴的流量只受上游滞止参数影响,而与下游压力波动无关^[19]。通过临界流动形成“相分离控制阀”,切断下游压力扰动向上传播的途径,从根本上抑制下游各支管路阻力特性不匹配所导致的相分离。

气液两相流声速可用 Wood 声速公式计算^[19]

$$C_m = \left(\frac{\gamma X R T_G}{\beta^2} \right)^{1/2} \tag{6}$$

式中: γ 为气体绝热指数; R 为气体常数; T_G 为气相温度; X 为气液两相流质量含气率; β 为体积含气率。

研究表明,气液两相混合物具有低声速特点,气液两相混合物声速远低于对应的单相气体或单相液体声速。在标准状况下,体积含气率为 0.5 时,气液混合物声速只有 20 m/s 左右^[20]。可见,与单相气体或液体相比,气液两相临界流动更易实现。

2 实验分配器结构

根据流型调整和临界分流均匀分配原理研制的实验分配器结构如图 2 所示,主要由主管路 1,分流喷嘴 2、3,以及旋流叶片和整流器组成。旋流叶片由多组螺旋叶片绕制而成。整流器为渐缩渐扩结构,旨在使螺旋液膜分布更加均匀。两分流喷嘴结构完全相同,布置在整流器下游,与主管路管壁垂直,喷嘴下游主管由盲板密封。主管管径为 40 mm,两侧支管直径均为 30 mm。分流喷嘴 2、3 的结构完全相同,喉部为直管段,直径为 8 mm,扩张角为 21°。两分流喷嘴出口与相应的侧支管路相连。

气液两相来流通过旋流叶片时产生旋转运动,在离心力作用下分层流、段塞流、半环状流等不对称流型被整改为液膜沿周向均匀分布的环状流。由于两取样喷嘴入口距离旋流叶片末端很近,液膜边沿轴线运动边做周向旋转,尽管主管 1 水平布置,但在较高液相折算速度下切向力对液膜分布影响远大于重力,分配截面上气液基本呈均匀分布,从而不同位置的分流喷嘴接触气液相的几率基本相等。气液两相流通过分流喷嘴时,由于分流喷嘴直径远小于主管路直径,随着流通面积的突然减小,气液两相流速迅速增加。如果在喉部速度达到当地声速,根据临界流理论,进入喷嘴的气液两相混合物将只取决于上游参数,而与下游各支管路压力分布无关。由于两喷嘴结构相同,则其分流特性也将完全一致,从而实现了气液两相均匀分流。

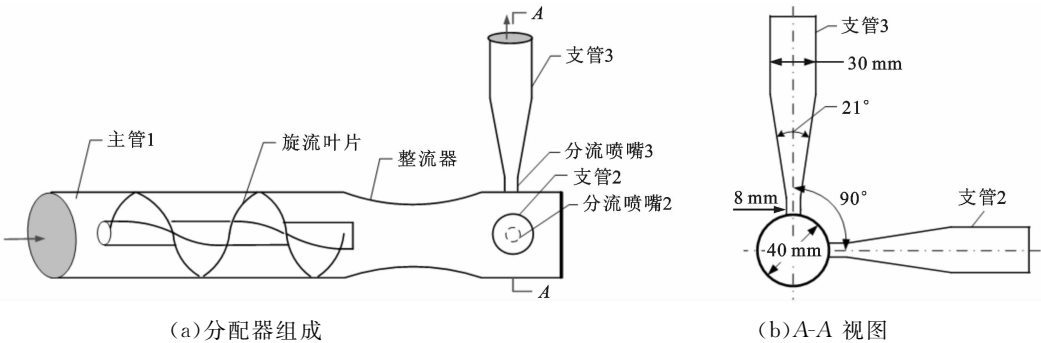


图 2 实验分配器结构示意图

3 实验系统

实验在如图3所示的气液两相流实验环道上进行,气、液介质分别采用空气和水。主管气相质量流量 M_{1G} 和液相质量流量 M_{1L} 经计量后在混合器中混合,随后进入测试段。测试段内径为 40 mm,上游安装有透明有机玻璃管制成的流型观察窗。气液两相流体经过实验分配器来流被分成两部分,其中一

部分进入支管2,另一部分进入支管3。进入支管2的流体在两相流管道末端由分离器分离成气液两相,气相排空,液相返回水箱循环。进入支管3的流体则进入计量分离器进行分离计量,其中液相流量 M_{3L} 采用高准质量流量计测量,气相体积流量采用横河气体旋涡流量计测量。为获得质量流量 M_{3G} 还同时测量了当地温度和压力。

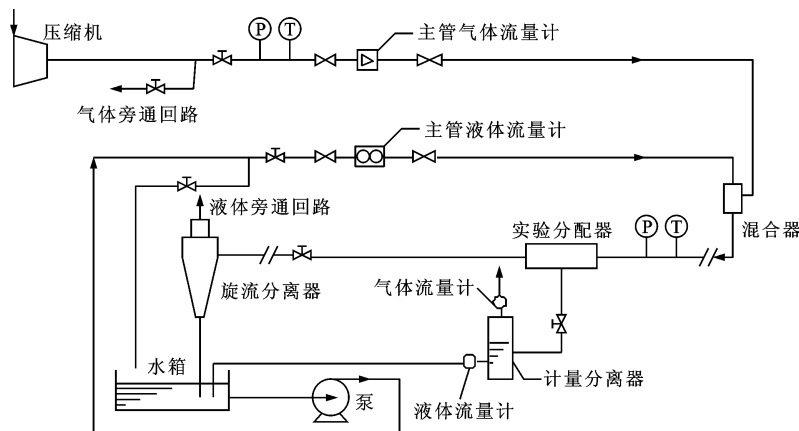


图3 实验测量系统示意图

实验过程中,实验分配器主管1和分流喷嘴2水平布置,喷嘴3保持垂直向上。实验液相折算速度范围为 0.013~0.16 m/s,气相折算速度范围为 7~20 m/s。实验中出现的流型包括波浪流、段塞流以及环状流。

为表征实验分配器的分配特性,采用分流系数 K_G 、 K_L 判断分配过程中是否发生相分离以及相分离的程度。 K_G 、 K_L 分别为进入分支管路3的气、液相质量流量与主管路相应质量流量的比值。

4 实验结果与讨论

为了判断取样过程中是否达到临界流动,将喷嘴喉部气、液混合速度 V_h 与式(6)计算的理论声速值 C_m 进行了对比,见图4。从图中可以看出,在环状流和段塞流型下,分流喷嘴喉部声速与理论声速接近,而在部分波浪流型下,喷嘴喉部速度远小于声速。这表明在高气液相流量下,容易实现临界流动,而在波浪流型下,因气液流速小,未达到临界流动。实验范围内未发现由于产生两相流激波所导致分流喷嘴压力急剧增加的现象。

图5为气液相分流系数实验测量结果。从图中可以看出,当液相折算速度 U_{SL} 大于 0.02 m/s 时,气相分流系数 K_G 与液相分流系数 K_L 基本相等,且

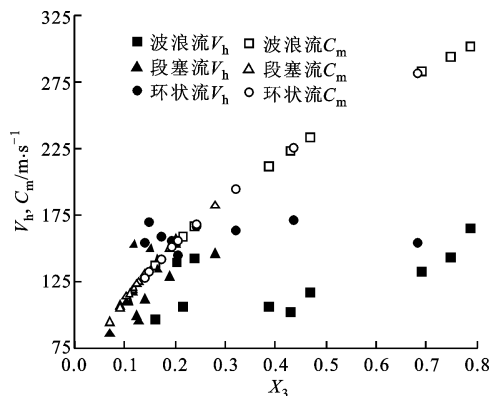
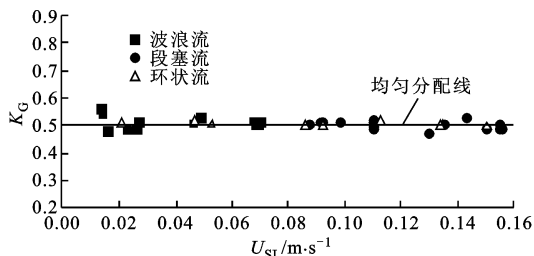


图4 气液两相流通过喷嘴实际流速与理论声速对比

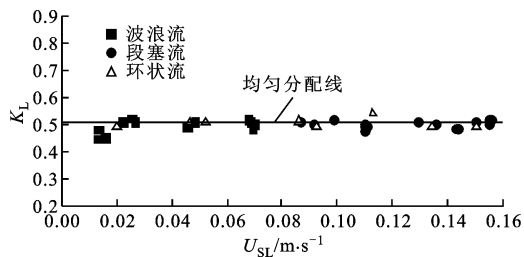
均在理论值 0.5 左右波动,与流型无关,表明进入侧支管3中的气液流量均为主管路的一半,实现了均匀分配。从图5还可看出,实验分配器在段塞流型下也有极好的分配效果。段塞流是气液两相流中最为复杂的流型,表现为气泡和液塞交替流过管截面,常规分配设备难以实现均匀分配,而通过流型调整和临界分流,使得分配器在结构对称的基础上进一步实现了各下游支路入口流型对称和阻力对称,从而两分流喷嘴具有一致的流动特性。

当液相折算速度小于 0.02 m/s 时, K_G 开始高于理论值,且随着液相折算速度的减小偏差加大。

其主要原因是,液相密度远大于气相,气液两相流在旋流叶片中旋转所需动量主要由液相提供。由于实验分配器主管 1 水平布置,当液相流速较小时没有足够的动量驱动气液旋转形成均匀的环状流,在重力作用下,底部液膜较厚,顶部液膜较薄,无法保证两分流喷嘴具有相同的人口条件。喷嘴 3 位于管壁顶部,此处液膜相对较小,因此进入支管 3 的液量降低,而气相对阻力变化敏感,更容易穿透较薄液膜进入支管 3,从而导致支管 3 的气相分流系数大于理论值,而液相分流系数小于理论值。



(a) 气相分流系数



(b) 液相分流系数

图 5 流型对气液相分流系数的影响

值得一提的是,在波浪流型下,当液相折算速度大于 0.02 m/s 时,由图 4 可知,虽然未达到临界流动,但其分流系数依然维持在 0.5 左右。其主要原因是进入喷嘴的气液流量主要取决于喷嘴入口条件和前后差压。对于实验分配系统,支管 2、3 出口压力均为大气压,因此两支管路出口压力相等,即 $P_{30} = P_{20}$ 。若气液两相流通过喷嘴下游支管路的阻力损失远小于在喷嘴处产生的压降,即 $\Delta P_{30} \ll \Delta P_{13}$, $\Delta P_{20} \ll \Delta P_{12}$,根据图 1 所示的阻力关系,则有 $\Delta P_{13} \cong \Delta P_{12}$,表明两喷嘴前后差压基本一致,从而两喷嘴分流特性也基本相同。可见,如果气液两相流通过喷嘴的压降在分配体系总压降中占主要部分,则有助于在一定程度上降低相分离程度。

图 6 为支管 3 质量含气率与主管路对比,可见在 $0.08 \sim 0.8$ 的质量含气率范围内,侧支管 3 中两相流质量含气率与主管 1 基本一致,最大偏差小于 $\pm 5\%$ 。这表明支管 3 与主管路基本具有相同的气

液组成,而对于传统的三通型分配器,气液相在分配时将发生显著的相分离,由于液相密度大,主要进入水平支管,进入竖直向上支管的基本全为气相。对于本文提出的分配器,由于实行了流型调整和临界分流,两喷嘴流动特性基本一致,在较宽的质量含气率范围内实现了均匀分配。

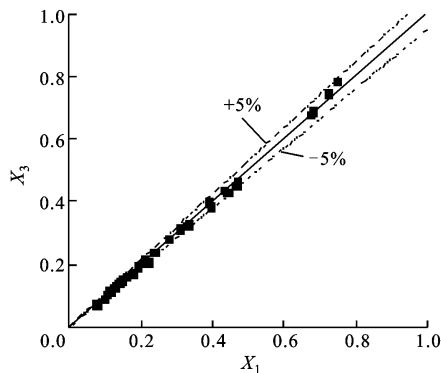


图 6 支管 3 与主管 1 的质量含气率对比

5 结 论

(1) 单纯的结构对称无法保证均匀分配,克服相分离的关键是保证各个下游支管路入口气液分布相同以及出口差压相等,为此提出了调整流型和临界分流的新方法,并研制了具有两个分流喷嘴的新型分配器结构。

(2) 实验结果表明:在临界分流条件下,气液相分流系数与入口气液相折算速度、流型、含气率等参数无关,能够在宽广的实验范围内维持恒定,消除了气液分配过程的相分离。

(3) 在未到临界分流条件时,气液相分流系数主要受液相折算速度以及喷嘴两侧差压在分配总压降中所占比重影响,提高二者数值有助于降低相分离程度。

(4) 本文所提出的分配器结构紧凑,无活动部件、分离装置和控制元件,有望在高压两相流分配系统中获得广泛应用。

参考文献:

- [1] AZZOPARDI B J. Phase separation at T junctions [J]. Multiphase Science and Technology, 1999, 11 (4): 223-329.
 - [2] 田敬, 吴明, 王帅. 应用改型三通实现气液两相流的等干度分配 [J]. 化工学报, 2014, 65(4): 836-841.
- TIAN Jing, WU Ming, WANG Shuai. Application of modified impacting tee to achieve equal quality distribution of gas-liquid two-phase flow [J]. Journal of

- Chemical Industry and Engineering, 2014, 65(4): 836-841.
- [3] 黄善仿, 王栋, 林宗虎. 气液两相流等干度流量分配方法研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 30(10): 1727-1730.
- HUANG Shanfang, WANG Dong, LIN Zonghu. New method on gas-liquid two-phase distribution with equal phase fraction in different branches [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 30(10): 1727-1730.
- [4] 张炳东, 刘丹, 王栋. 分相式气液两相流体等干度分配方法[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(5): 106-110.
- ZHANG Bingdong, LIU Dan, WANG Dong. Equal quality distribution of gas-liquid two-phase flow using phase separation method [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(5): 106-110.
- [5] WANG S, SHOJI M. Fluctuation characteristics of two-phase flow splitting at a vertical impacting T-junction [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2002, 28(12): 2007-2016.
- [6] EL-SHABOURY A M F, SOLIMAN H M, SIMS G E. Two-phase flow in a horizontal equal-sided impacting tee junction [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2007, 33: 411-431.
- [7] MOHAMED M A, SOLIMAN H M, SIMS G E. Experimental investigation of two-phase flow splitting in an equal-sided impacting tee junction with inclined outlets [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 35(6): 1193-1201.
- [8] ZHANG B, ZHANG X, WANG D, et al. Equal quality distribution of gas-liquid two-phase flow by partial separation method [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2013, 57: 66-77.
- [9] WREN E, AZZOPARDI B J. Affecting the phase split at a large diameter T-junction by using baffles [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2004, 28(8): 835-841.
- [10] STOISITS R F, PINTO M T. Improved static mixer design for achieving equal phase splitting at pipe junctions [C]//SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium. Bakersfield, California, USA: Society of Petroleum Engineers, 1999: 221-228.
- [11] 王妍芃, 徐宝全, 王树众, 等. 水平并联管系统中两相流流量分配特性的可视性研究[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(7): 65-69.
- WANG Yanpeng, XU Baoquan, WANG Shuzhong, et al. Study on the gas-liquid two-phase flow distribution characteristics of a horizontal parallel tube system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32(7): 65-69.
- [12] DONG W, ZONG H L. Gas-liquid two-phase flow measurement using ESM [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(6/7): 827-832.
- [13] WANG D, LIANG F C, PENG Z Q, et al. Gas-liquid two-phase flow measurements by full stream batch sampling [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2012, 40: 113-125.
- [14] 梁法春, 陈婧, 王栋, 等. 气液两相流破口泄漏的相分离实验研究[J]. 高校化学工程学报, 2008, 22(3): 519-523.
- LIANG Fachun, CHEN Jing, WANG Dong, et al. Experimental study on the phase splitting characteristics of gas-liquid two-phase flow through small break [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2008, 22(3): 519-523.
- [15] WALLIS G B. Critical two-phase flow [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1980, 6(1): 97-112.
- [16] MIRZAEI-PAIAMAN A. An empirical correlation governing gas-condensate flow through chokes [J]. Petroleum Science and Technology, 2013, 31(4): 368-379.
- [17] 梁法春. 气液两相流体取样分配器及其在流量测量中的应用[D]. 西安: 西安交通大学, 2006.
- [18] LIN Z H. Two-phase flow measurements with sharp-edged orifices [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1982, 8(6): 683-693.
- [19] 刘大有. 两相速度平衡条件下的两相流声速[J]. 力学学报, 1990, 22(6): 660-669.
- LIU Dayou. The speed of sound in two-phase flows under the condition of velocity-equilibrium between phases [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1990, 22(6): 660-669.
- [20] SHOHAM O. Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes [M]. Richardson, TX, USA: Society of Petroleum Engineers, 2006.

(编辑 荆树蓉)